

# 丹江口水库核心水源区化肥施用分布特征及其环境 风险评价

龚世飞<sup>1</sup> 肖能武<sup>1</sup> 丁武汉<sup>2</sup> 郭元平<sup>1</sup> 叶青松<sup>1</sup> 王巍<sup>1</sup> 李虎<sup>2\*</sup>

(1. 丹江口库区十堰生态农业研究院, 湖北十堰 442000;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**【摘要】**丹江口库区是南水北调中线工程的核心水源区, 全面认识库区农业化肥施用的空间分布差异及对生态环境的潜在威胁, 是加强化肥施用风险管控的前提。运用化肥污染环境风险评价模型, 以十堰市为例, 对各县(区、市)2020年主要农作物化肥施用特征和环境风险进行定量分析和评价。结果表明:十堰市2020年主要农作物化肥施用总量达8.97万t, 且以复合肥为主, 其中玉米和薯类是化肥施用总量最多的两种作物, 二者的综合施用量达到全市化肥投入总量的50.37%, 其次为小麦和油菜, 稻谷、花生和豆类的化肥施用量占比相对较小。十堰市化肥施用存在明显的空间异质性, 其中郧阳区和竹山县是化肥投入量最大的两个地区, 而张湾区和茅箭区是化肥投入量最小的两个地区;各区间化肥在农作物上的分布特征不尽相同, 大致可分为小麦—玉米轮作体系主导型、玉米||薯类间作体系主导型和玉米—油菜轮作体系主导型3种类型。十堰市单位播种面积平均化肥施用强度为 $343.07\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 超出我国生态县建设制定的化肥施用标准( $250\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 是发达国家化肥施用环境安全标准上限的1.52倍, 且区域间存在差异。十堰市多数地区化肥施用风险程度处于中等风险水平, 但竹山县和张湾区已进入重度风险状态。十堰市整体化肥施用的风险指数达0.697, 尚处于中等风险水平, 但存在演变为重度风险的隐患, 其中氮肥和磷肥的施用风险程度整体已进入重度风险水平, 钾肥施用伴随的环境风险整体处于中等风险的较低水平。水源区化肥施用负荷过高是多种因素相互作用造成的, 相关部门应根据不同地区化肥负荷来源, 从施肥技术、政策引导、机制激励、观念更新等方面采取有效措施, 实现化肥“减施增效”和环境风险“可防可控”的双重目标。

**【关键词】**丹江口水源涵养区 化肥施用负荷 分布特征 环境风险评价

**【中图分类号】**:X592 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)10-2259-13

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210014

化肥施用作为一种常规的农业生产技术, 在提高农作物产量进程中发挥了十分重要的作用, 据测算, 我国化肥施用对粮食产量的贡献率一度达到56.81%<sup>[1]</sup>。长期以来, 化肥的施用对保障我国粮食安全和重要农产品有效供给具有不可替代的贡献。然而, 在促进作物高产稳产的同时, 不合理的化肥施用必然引起农

<sup>1</sup>收稿日期:2021-10-09;修回日期:2021-11-22

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015)

作者简介:龚世飞(1990~),男,农艺师,主要研究方向为农业资源利用与环境护.E-mail:gongsf@163.com

\*通讯作者: E-mail:413740790@qq.com;lihu0728@sina.com

业面源污染<sup>[2]</sup>，其伴随的环境风险同样不容忽视。美国环保局 2017 年公布的调查结果显示，农业化肥引起的面源污染导致该国约 40% 的河流和湖泊水体水质处于不达标状态<sup>[3]</sup>。在瑞典，流域总氮输入量的 60%~87% 来源于农业化肥<sup>[4]</sup>。在德国，过度施用化肥致使部分河流中磷的浓度处于  $0.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上<sup>[5]</sup>。我国的农业面源污染问题同样令人担忧，不合理的化肥施用是其主要原因<sup>[6, 7]</sup>。据统计，自 1978 年至 2015 年，我国农用化肥施用总量从  $8.84\times 10^6\text{t}$  持续增长到  $6.02\times 10^7\text{t}$ ，年均增长率接近 5%，施用总量达到全球的 1/3，单位耕地面积的化肥施用量高达  $443.53\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，单位播种面积化肥施用量为  $323\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，大幅超过了发达国家为防止化肥对环境造成危害所设置的安全上限  $225\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[8, 9]</sup>，与此同时，我国三大主要粮食作物水稻、小麦和玉米的氮肥利用率分别为 27.3%、38.2% 和 31.0%，磷肥利用率为 13.0%、16.9% 和 15.3%，钾肥利用率为 28.1%、25.6% 和 30.5%<sup>[10]</sup>。未被作物吸收利用的养分易被土壤固化造成土壤质量下降，或通过地表径流导致水体富营养化，同时还存在长期挥发引起大气污染的可能<sup>[8, 11]</sup>。当前，我国化肥过量施用的现象较为普遍且已经远远超过了其经济意义上的最优施用量<sup>[12~14]</sup>，但由于对农产品的刚性需求，使得化肥施用压力有增无减<sup>[15]</sup>，化肥施用伴随的潜在压力和面临的环境风险是其它国家无法相比的<sup>[16]</sup>。因此，明确化肥施用负荷、污染物来源、评价相应的风险等级，对有针对性地制定化肥减量和风险管控策略具有重要意义。刘钦普<sup>[17]</sup>基于瑞典科学家 Hakanson<sup>[18]</sup>提出的重金属污染风险评价方法设计而来的化肥施用环境风险评价模型，由于其求得的风险指数值介于 0~1 之间，有上限和下限，便于对风险程度进行认识和比较，因此被学界广泛认可和应用<sup>[19~22]</sup>，是当前国内较为主流的评价方法。

丹江口库区位于我国南水北调中线工程源头，是生态功能极重要区和生态环境极敏感区，水源地生态环境状况直接关系到京、津、冀地区的战略性用水安全。国务院 2017 年批准的《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划》目标是库区水质长期稳定达到国家地表水环境质量标准 (GB3838—2002) II 类水标准，然而，前人对水源地典型流域农业面源污染的监测结果并不乐观，其中水体中 TN 平均质量浓度已超过 IV 类水标准，TP 平均质量浓度接近 II 类水标准<sup>[23]</sup>。在部分地区，化肥施用量的年均增速达到了 5.5%，氮、磷、钾肥的利用率分别仅为 30%~55%、10%~25% 和 35%~50%<sup>[24]</sup>。对水源地化肥施用负荷和环境影响评估结果显示，高污染地区比例和整体施肥风险指数呈逐年增加趋势<sup>[19]</sup>，潜在的威胁着水源地生态安全。目前学界对库区的认识多围绕在农业面源污染排放特征<sup>[23]</sup>、污染源构成及区域分布等方面<sup>[25]</sup>，对化肥施用的污染评估主要集中在市域尺度<sup>[19]</sup>和氮、磷等特定污染物<sup>[25]</sup>，缺乏从县域层面和单一作物、单一肥源角度对化肥施用负荷和环境风险进行研究和评价，以致影响了核心水源区化肥污染防控措施制定和实施效果。十堰市地处丹江口库区下游腹地，是国家级生态示范区和鄂西北山区国家级生态功能保护区，同时还是南水北调中线工程的纯调水区和核心水源涵养区，地理位置尤为特殊。全市常用耕地面积  $195.43\times 10^3\text{hm}^2$ ，坡度大、切割深，极易发生地表径流。当前的研究指出，十堰地区耕地总化肥负荷达  $752.92\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，整体处于高级负荷区间，其中氮肥施用负荷在化肥施用过程中占主导作用，同时，磷肥负荷强度也已进入较高级负荷状态，且肥料的施用结构失衡现象严重<sup>[19]</sup>，而化肥施用是该地区水体中 TN 和 TP 的重要污染源<sup>[25]</sup>，基于此，本文以十堰市为例，从县域尺度和主要农作物角度，运用化肥污染环境风险评价模型，对研究区化肥施用负荷及空间分布特征进行分析，计算化肥施用的风险指数，评估化肥施用的风险等级，明确化肥污染的环境风险现状及成因，期待为核心水源涵养区化肥污染综合防控和水生态环境保护以及农业可持续发展提供有益借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

十堰市范围介于  $31^{\circ} 97' \text{N} \sim 33^{\circ} 25' \text{N}$ ， $109^{\circ} 51' \text{E} \sim 111^{\circ} 72' \text{E}$ ，全市版图面积  $2.36\text{万 km}^2$ ，辖三区四县一市，分别是茅箭区、张湾区、郟阳区、郟西县、竹溪县、竹山县、房县和丹江口市。全市 2020 年总人口 346.16 万人，其中农业人口 244.51 万人。土壤以黄棕壤居多，地形地貌多样，以坡地和丘陵为主，海

拔 300~1700m 之间。十堰市气候属北亚热带大陆性季风湿润气候，年平均气温 13℃~16℃，年平均日照时数 1655~1958h，无霜期 224~255d。年平均降水量 829mm，径流深 263.4mm。

## 1.2 化肥施用负荷分级

由于化肥施用负荷受作物目标产量、自然生态条件、社会经济条件和农田管理水平等因素的综合作用影响，因此不同地区间的化肥施用负荷往往存在较大差异。目前学界关于化肥施用负荷的分级标准并不一致，研究人员<sup>[19, 21, 26]</sup>通常会根据研究区域的变化而确定不同的分级标准。从十堰市农业生产基础背景和化肥施用负荷现状的角度考量，本研究认为，以我国生态县建设化肥施用负荷标准的 2 倍值(500kg·hm<sup>-2</sup>)、2.2 倍值(550kg·hm<sup>-2</sup>)和 2.5 倍值(625kg·hm<sup>-2</sup>)作为分级标准是较为合理的，在此基础上，将研究区化肥施用负荷(F)由低到高分四个等级，分别为低级(F<500)、中级(500<F<550)、较高级(550<F<625)和高级(F>625)，单质化肥的负荷分级按照我国大田作物适宜的比例氮、磷、钾(2:1:1)进行折算[21]。

## 1.3 环境风险评价模型

运用刘钦普<sup>[17]</sup>提出的模型对十堰市化肥施用环境风险进行评价，具体计算方法如下：

$$F_i = \frac{M_i}{A} \quad (i = N, P, K) \quad (1)$$

$$R_i = \frac{F_i}{F_i + T_i} \quad (i = N, P, K) \quad (2)$$

$$R_T = \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad (i = N, P, K) \quad (3)$$

式中： $M_i$ 表示当年化肥施用量(kg)，以折纯量来表示； $A$ 表示耕地面积(hm<sup>2</sup>)； $F_i$ 表示化肥施用负荷(kg·hm<sup>-2</sup>)； $T_i$ 为单项化肥环境安全阈值(kg·hm<sup>-2</sup>)，根据生态环境部 2007 年提出的生态县建设化肥施用限值(250kg·hm<sup>-2</sup>)和我国大田粮食生产适宜的氮磷钾肥施用比例(2:1:1)进行折算<sup>[21]</sup>，本研究中单项氮、磷、钾肥环境安全阈值分别取 125、62.5、62.5kg·hm<sup>-2</sup>； $R_i$ 是化肥施用指数； $W_i$ 为单质化肥施用风险权重，其值介于 0~1，参考现有研究结果<sup>[17]</sup>，本研究中单质氮、磷、钾肥风险权重分别取 0.648、0.230 和 0.122； $R_T$ 为施肥环境风险总指数； $n$ 为单项化肥种类数。

公式(2)、(3)中的  $R_i$  与  $R_T$  介于 0~1 之间。当  $R_i=0.5$  时， $F_i=T_i$ ，即施肥环境安全的临界点；当  $R_i$ 、 $R_T$  趋近 1 时， $F_i>T_i$ ，即环境化肥污染存在极严重风险；当  $R_i$ 、 $R_T$  趋近 0 时， $F_i$  趋于 0， $F_i<T_i$ ，即不施用化肥的有机农业状态。根据环境风险指数偏离 0.5 的程度，把化肥施用环境风险从相对安全到严重风险分为 5 个不同的等级，详见表 1。

表 1 化肥施用环境风险指数分级

等级	环境风险指数	风险程度	分类依据
4	>0.75	严重风险	施肥量超过安全阈值 3 倍以上
3	0.70-0.75	重度风险	施肥量不超过安全阈值 3 倍
2	0.60-0.70	中度风险	施肥量不超过安全阈值 2.5 倍
1	0.50-0.60	低度风险	施肥量不超过安全阈值 1.5 倍
0	≤0.50	相对安全	施肥量不超过安全阈值

#### 1.4 数据来源

本研究中涉及的农作物种植面积信息来源于《十堰市统计年鉴—2020》。由于玉米、小麦、稻谷、油菜、花生、薯类和豆类的种植面积约占全市播种总面积的 90%，因此本文以上述 7 种农作物为研究对象。不同作物单位面积化肥施用数据查询自国家发改委编写的《全国农产品成本收益资料汇编—2019》<sup>[27]</sup>。由于在现有资料中关于复合肥中氮、磷、钾含量的比例尚不明确，因此笔者根据市场调查情况，确定本研究复合肥中的氮、磷、钾含量统一按 1:1:1 进行处理。研究区主要农作物种植面积及施肥水平基础信息见表 2，各县(区、市)不同农作物播种面积见表 3。

表 2 十堰市主要农作物种植面积及施肥水平

作物种类	种植面积(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	单位面积化肥折纯用量(kg·hm <sup>-2</sup> )			
		氮肥	磷肥	钾肥	复合肥
玉米	69.46	116.55	11.10	—	224.70
小麦	56.56	69.45	1.65	—	221.40
稻谷	26.48	74.85	0.60	4.50	256.50
油(	43.82	73.20	5.25	2.55	180.60
花生	17.89	38.85	16.95	3.00	260.70
薯类	32.53	—	—	—	636.45
豆类	14.64	16.20	2.25	6.60	102.00

表 3 十堰市各县(区、市)农作物种植结构

区县	种植面积(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )							合计
	玉米	小麦	稻谷	油菜	花生	薯类	豆类	
郧阳区	15.95	22.43	4.96	8.15	2.66	4.61	1.54	60.30
郧西县	12.64	11.31	2.03	5.51	2.63	6.63	2.62	43.37
竹山县	15.55	7.32	5.11	10.57	7.76	6.86	4.31	54.48
竹溪县	10.87	4.16	5.15	9.45	1.97	9.53	4.17	45.30
房县	11.16	2.13	4.79	6.60	1.36	2.07	1.12	29.23
丹江口	5.83	9.02	4.41	3.41	1.39	2.74	0.80	27.60
茅箭区	0.19	0.09	0.01	0.02	0.01	0.03	0.04	0.39
张湾区	0.27	0.10	0.02	0.11	0.11	0.06	0.04	0.71

## 2 结果与分析

### 2.1 十堰市主要农作物化肥施用量

2020 年十堰市主要农作物化肥施用量如图 1 所示，全市化肥施用总量为 8.97 万 t。从不同作物的化肥施用比例来看，玉米的施肥量最大为 2.45 万 t，占农作物施肥总量的 27.29%，其次为薯类 2.07 万 t，占施肥总量的 23.08%。小麦是十堰市第二大农作物和第三大施肥作物，全年施肥量 1.65 万 t，占化肥施用总量的 18.44%。施肥量排名四至六的作物是油菜、稻谷和花生，其施肥量分别约为玉米、薯类和小麦的一半，依次为 1.15 万 t、0.89 万 t 和 0.57 万 t。豆类是十堰市化肥施用量最小的作物类型，全年施用化肥 0.19 万 t，仅占全市农作物施肥总量的 07%。

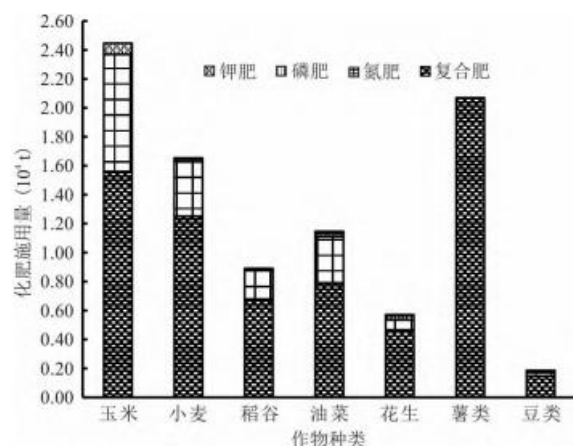


图1 十堰市主要农作物化肥施用量(万 t)

从全市农业化肥施用结构分析,复合肥是十堰市最主要的施肥类型,全年施用量为6.97万t,约占全市农作物施肥总量的比例高达77.72%。同时,复合肥也是所有农作物的施肥首选,其中尤以薯类的需求量最大,其次为玉米1.56万t,二者对复合肥的需求量占复合肥施用总量的52.08%,小麦、油菜、稻谷、花生和豆类生产中复合肥施用量依次减少,分别为1.25万t、0.79万t、0.68万t、0.47万t和0.15万t,占各自施肥总量的63.93%、75.69%、68.94%、76.21%、81.59%和80.11%。单质氮肥是仅次于复合肥的第二大施肥类型,全年施用量为1.81万t,占农作物施肥总量的20.19%,且主要被用于玉米、小麦和油菜生产。单质磷肥和单质钾肥的需求量较小,全年施用量分别为0.14万t和0.04万t,仅占施肥总量的2.09%。由于复合肥能提供作物生长所需的多种营养,且受山区农业劳动强度高、劳动力缺乏等客观因素和生产者投入意愿低等主观因素的双重影响,因此,在肥料施用类型选择时,复合肥更容易被普遍接受,这是生产者自主选择的结果。

## 2.2 十堰市化肥施用空间分布特征

十堰市化肥施用空间分布特征和下辖各县(区、市)主要农作物化肥施用比例存在明显差异(图2)。其中郧阳区和竹山县是化肥投入量最大的两个地区,全年施肥量分别达到19961.15和18440.42t,占全市施肥总量的22.26%和20.56%。其次为竹溪县和郧西县,全年化肥施用量分别为16476.26和15279.11t,占全市施肥总量的18.38%和17.04%。房县和丹江口市的化肥投入量差距不明显,分别为9787.67和9357.97t,占全市施肥总量的10.91%和10.44%。张湾区和茅箭区受限于播种面积,其化肥施用量相对较小,仅为238.30和129.24t。分析各县(区、市)不同农作物化肥施用情况可知,十堰市化肥在作物间的施用比例大致可分为小麦—玉米轮作体系主导型、玉米+薯类间作体系主导型和玉米—油菜轮作体系主导型3种类型。其中郧阳区、丹江口市和茅箭区化肥施用属于小麦—玉米轮作体系主导型,两种作物的化肥施用量分别占本地区化肥投入总量的61.02%、50.15%和72.17%。郧西县、竹山县、竹溪县和张湾区化肥施用属于玉米+薯类间作体系主导型,两种作物的化肥施用量分别占本地区化肥投入总量的56.77%、47.65%、60.06%和55.95%。房县化肥施用属于玉米—油菜轮作体系主导型,两种作物的化肥施用量占该县化肥投入总量的比例达到57.82%。可见,不同县(区、市)在化肥施用上具有显著的空间异质性,这主要与不同地区的耕作面积和种植制度存在差异密切相关。

## 2.3 十堰市化肥施用负荷特征

由于十堰市属二熟制地区,为更准确的反映十堰市单位土地化肥施用负荷,本研究利用各县(区、市)夏、秋两茬作物的播种面积分别确定实际耕地面积及相应的复种指数,再代入模型(1)求得具体的化肥施用负荷水平及分级区间见表3。

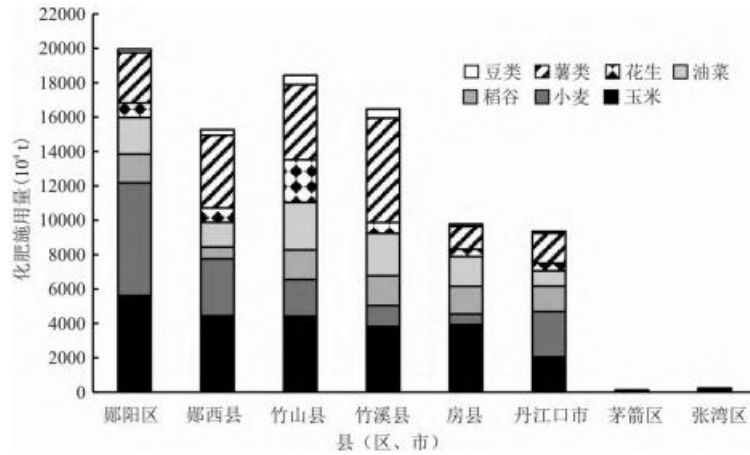


图 2 十堰市各县(区、市)主要农作物化肥施用量 (t)

由表 4 可知, 十堰市单位耕地面积化肥施用平均强度为  $555.09\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 处于较高级分级区间, 全市复种指数为 1.62, 单位播种面积化肥施用强度为  $343.07\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 超出我国生态县建设制定的化肥施用标准, 更是部分发达国家倡导的化肥施用环境安全上限  $225\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的 1.52 倍。具体来看, 在总化肥施用负荷方面, 全市仅鄢阳区处于高级状态, 鄢西县和丹江口市处于较高级状态, 处于中级状态的地区有 2 个(竹山县、竹溪县), 其他 3 个地区(房县、茅箭区、张湾区)处于低级区间。氮肥平均施用强度为  $303.15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 负荷分级为 2 个高级、4 个较高级和 2 个中级, 磷肥平均施用强度为  $146.23\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 负荷分级为 3 个高级、1 个较高级、2 个中级和 2 个低级, 钾肥平均施用强度为  $105.72\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 负荷分级仅鄢西县处于较高级, 其他 7 个地区均处于低级负荷状态。分析全市氮、磷、钾肥平均施用强度, 氮肥和磷肥总体处于较高级负荷区间, 钾肥处于低级负荷, 全市氮、磷、钾肥平均施用比例为 1 : 0.48 : 0.35, 低于发达国家 1 : 0.5 : 0.5 的比例。同时, 氮肥施用负荷占比为 45.61%~58.51%, 磷肥施用负荷占比为 25.07%~27.82%, 钾肥施用负荷占比为 16.40%~26.57%, 且各县(区、市)间单位土地的化肥使用强度也存在较大差异, 氮肥的施用水平极值比为 1.45, 磷肥为 1.44, 钾肥的极值比更大, 达到了 2.02, 这表明水源地整体存在化肥过量施用的现象, 且在部分地区化肥偏施现象较为突出, 其中氮肥施用负荷在化肥施用过程中占主导作用。

表 4 十堰市各县(区、市)化肥施用负荷量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )及分级

区县	复种指数	氮肥		磷肥		钾肥		总化肥	
		负荷	分级	负荷	分级	负荷	分级	负荷	分级
鄢阳区	1.99	380.60	高级	167.05	高级	111.58	低级	659.22	高级
鄢西县	1.63	262.50	中级	160.09	高级	152.89	较高级	575.48	较高级
竹山县	1.49	279.75	较高级	134.33	中级	89.89	低级	503.97	中级
竹溪县	1.43	284.19	较高级	140.19	较高级	95.54	低级	519.92	中级
房县	1.43	278.18	较高级	119.71	低级	79.55	低级	477.45	低级
丹江口	1.82	350.70	高级	158.65	高级	107.53	低级	616.87	较高级
茅箭区	1.39	270.08	中级	115.78	低级	75.70	低级	461.57	低级
张湾区	1.48	283.34	较高级	129.19	中级	83.94	低级	496.47	低级
平均值	1.62	303.15	较高级	146.23	较高级	105.72	低级	555.09	较高级

N: P: K=1: 0.48:0.35

## 2.4 十堰市化肥施用环境风险评价

根据环境风险评价模型(2)和(3)及相关参数,计算出十堰市化肥施用风险评价指数及所处的风险程度如表5所示。十堰市整体化肥施用风险程度尚处于中等风险水平,风险指数为0.697,存在演变为重度化肥污染风险的隐患,其中氮肥和磷肥的施用风险程度已进入重度风险水平,钾肥施用伴随的环境风险整体较小。分析各县(区、市)化肥施用环境风险可知,总化肥施用处于严重风险的地区有2个,分别是竹山县和张湾区,其他6个地区的总化肥施用风险指数均处于中等风险水平。氮肥施用的环境风险等级分布为1个严重风险、1个重度风险和6个中等风险,磷肥施用的环境风险等级分布为3个重度风险和5个中等风险,钾肥施用的环境风险等级分布为1个重度风险、3个中等风险和4个低风险。由表5可知,总化肥施用处于重度风险的竹山县和张湾区,其氮磷肥施用的风险程度高于其总化肥施用风险,处于严重风险或重度风险状态,其钾肥施用的环境风险处于中等风险状态,明显低于总化肥施用风险。在总化肥施用处于中等风险的6个地区中,除竹溪县的磷钾肥施用风险处于重度风险状态外,其他地区的氮磷肥均处于中等风险状态,且钾肥施用风险等级分布表现为2个中等风险和4个低风险。这表明在水源地化肥施用重度风险区。要尤其关注氮磷肥的施用风险。在化肥施用中等风险区,竹溪县的磷钾肥施用风险尤其突出,需要引起重视,总体来看,中等风险区的氮磷肥施用环境风险与总化肥基本保持一致,钾肥施用的环境风险整体较总化肥略低。

表5 十堰市各县(区、市)化肥施用风险指数及风险等级

区县	总化肥		氮肥		磷肥		钾肥	
	I	D	I	D	I	D	I	D
郧阳区	0.659	MR	0.684	MR	0.649	MR	0.548	LR
郧西县	0.675	MR	0.694	MR	0.674	MR	0.573	LR
竹山县	0.733	SR	0.753	ESR	0.728	SR	0.641	MR
竹溪县	0.691	MR	0.677	MR	0.719	SR	0.710	SR
房县	0.677	MR	0.691	MR	0.682	MR	0.590	LR
丹江口	0.683	MR	0.695	MR	0.692	MR	0.605	MR
茅箭区	0.667	MR	0.690	MR	0.657	MR	0.560	LR
张湾区	0.720	SR	0.737	SR	0.717	SR	0.632	MR
十堰市	0.697	MR	0.708	SR	0.701	SR	0.628	MR

## 3 讨论

### 3.1 十堰市化肥施用量及分布特征

对十堰市主要农作物化肥施用量的测算结果显示,全市全年化肥施用总量接近9万t。其中玉米既是第一大播种作物也是第一大耗肥作物,其化肥施用量超过全市施肥总量的1/4。薯类作为十堰市第四大作物,其播种面积仅占全市播种总面积的12.46%,但施肥量却接近全市施肥总量的1/4,这主要与薯类作物单位面积施肥水平显著高于其他作物有关。玉米和薯类作物以不足全市40%的播种面积消耗了超过全市一半的化肥,表明这两种作物是十堰市最主要的化肥施用对象,其化肥施用强度已远远超出全市平均施用水平,尤其是薯类作物的化肥施用需严格把控。小麦和油菜是十堰市第二和第三大播种作物,分别以占全市21.67%和16.79%的播种面积消耗了18.44%和12.82%的化肥,说明这两种作物的施肥水平较全市平均水平略低。相应的,稻谷、花生和豆类的施肥水平较全市平均水平更低。造成单位耕地化肥施用负荷相对较高及作物间施肥水平差异较大的原因是多方面的,一是因为种植业效益比较低,大多数农户为获得高产而选

择增施化肥<sup>[17]</sup>。二是因为十堰市属于典型的山区农业<sup>[23]</sup>，农田以坡耕地为主，土壤肥力较差，通过施用有机肥来改善土壤质量的操作难度较大，且化肥随地表径流损耗严重，促使农户增加化肥投入<sup>[28, 29]</sup>。三是因为山区土地破碎，农户单位化肥投入强度会随着耕地细碎化程度升高而增大<sup>[30, 31]</sup>，且施肥方式以撒施和浅施为主，导致肥料利用率普遍不高<sup>[32]</sup>，不利于化肥减量施用<sup>[19]</sup>。四是因为当地传统施肥理念固化，玉米、薯类、小麦、水稻等粮食作物的施肥量显著高于油菜、豆类和花生等油料作物，而玉米生产中的过量施肥程度平均达到 50.74%，小麦和水稻生产中的过量施肥程度分别为 27.26%和 24.67%<sup>[13]</sup>；且随着生活水平的提高，玉米和薯类作物的需求弱化，其种植区分布多转移为土壤肥力稍差、需肥性较强的田块，为保持产量基本稳定，使得这两种作物的施肥量进一步加大，引起不同作物间明显的施肥水平差异。

研究结果还表明，十堰市各县(区、市)在化肥施用空间分布上存在显著的不平衡现象。其中郧阳区和竹山县是化肥施用的重点区域，其次为竹溪县和郧西县，以上四个地区的化肥施用量超出全市化肥施用总量的四分之三。同时，各县(区、市)间化肥施用在作物上的分布特征也不尽相同，这主要是由于不同地区间播种面积、作物类型和种植制度等差异造成的。具体分析可知，郧阳区和竹山县是全市播种面积最大的两个地区，其中郧阳区的复种指数居全市首位，是单位土地周年二次施肥频率最高的地区。竹溪县和郧西县的播种面积紧随其后，且竹溪县是全市单位面积化肥施用量最高的作物类型薯类种植面积最大的地区，而郧西县的复种指数也超出了全市平均值，从而导致这些地区的化肥施用负荷较高且主要分布于玉米、薯类和小麦三种作物。房县的播种面积和化肥施用总量较丹江口市略高，与此同时，其复种指数却明显低于后者，说明两个地区间的农作制度存在显著差异，这主要与不同作物对生长环境和水热资源的需求密切相关。

### 3.2 十堰市化肥施用结构分析

从化肥投入类型上看，复合肥的施用量远远高于单质肥料，且在作物间的投入量分布与单一作物施肥总量的规律基本一致，其中薯类和玉米对复合肥的需求依然占据前两位，其次分别表现为小麦>油菜>稻谷>花生。复合肥施用量占比较大是我国近年来化肥施用总体结构的显著特征<sup>[33]</sup>，首先与复合肥的营养结构有关，由于单质肥难以满足不同农作物对养分的多样化需求，复合肥因其具有养分含量高，营养均衡，理化性状好等优点，在促进作物高产稳产中具有突出优势，因此极容易被农民所接受。其次是由劳动力不足引起的，由于十堰市耕地分散，生产强度大，机械作业不便，为保证产量，农户有增施化肥并减少施肥次数以降低劳动投入的动机<sup>[32]</sup>。此外，由于多数农户尚不具备从不同作物需肥规律的角度选择相应化肥类型的能力，因此施肥技术的缺乏也导致了盲目施用复合肥的现象存在。在单质肥料的选择上，十堰市的投入量表现为单质氮肥>单质磷肥>单质钾肥，这与我国长期以来的化肥施用结构是一致的<sup>[33]</sup>。单质氮肥的施用量远高于磷肥和钾肥，不同元素之间存在较大差异与传统经验性施肥行为密切相关，当地大多数农户对氮肥的重视程度远高于其他肥料，加之作物对氮磷钾的需求程度不一致，对氮的需求量更大，使得农作物的氮肥施用水平长期高于磷肥和钾肥。刘奇鑫等<sup>[34]</sup>研究指出，种植作物类型是影响氮和磷化肥施用强度的主控因子，在本研究中，玉米、小麦和油菜是十堰市播种面积最大的三类作物，同时也是对单质氮肥需求最为旺盛的作物类型，其单质氮肥消耗量分别占单质氮肥施用总量的 44.60%、21.64%和 17.67%，然而，这三种作物却极少施用甚至不施用单质磷肥和钾肥。此外，氮肥的利用率高于磷肥也可能是诱发氮肥增施、磷肥减施的驱动因素之一，以上多种原因共同作用，使得十堰市氮、磷、钾肥施用结构出现明显分化。全年氮、磷、钾肥平均施用比例为 1:0.48:0.35，说明当前十堰市化肥投入结构并不理想，结合本文研究结果进一步分析可知，十堰市钾肥平均施用负荷达 105.72kg·hm<sup>-2</sup>，已远远超出发达国家提倡的钾肥单位用量和我国生态县钾肥施用限值，与此同时，不同肥源的投入比例仍存在较大差距，这也反映出十堰市氮、磷肥过量施用现象较钾肥更为严重的现实。张卫峰等<sup>[35]</sup>的调查数据表明我国氮肥、磷肥施用面积比例分别达 87%和 66%，而钾肥施用面积比例仅占 43%。杨帆等<sup>[36]</sup>的研究也同样发现种植业氮、磷供应分别过剩 1080 和 680 万 t，而钾肥缺口达 370 万 t。同时，刘成等<sup>[37]</sup>以油菜为研究对象，证实化肥投入结构不合理会显

著降低作物生产成本效率,其中氮肥过量投入以及钾肥投入不足均会对生产效率造成显著的负面效应。因此,在今后化肥投入过程中,要严格避免偏施重施,加强平衡施肥。

### 3.3 十堰市化肥施用环境风险评价及防控措施

科学运用评价模型对化肥施用环境风险进行分析是明确区域化肥施用负荷状态的重要基础,也是针对性提出相关风险防控政策的关键依据。由于不同地区的土壤类型、作物类别和气象条件存在差异,会对化肥施用环境风险造成不同程度的影响,因此,在运用环境风险评价模型时,一方面要摸清研究区域的空间变化对环境风险的影响,提出更加准确的单质肥料风险权重系数;另一方面,要根据不同研究区域的生态建设目标、作物需肥规律、土壤本底肥力、传统施肥水平等因素,动态设定化肥施用环境安全阈值参数。总之,化肥施用环境风险的影响因素众多,如何因地制宜的对评价模型进行优化和完善将是今后的重要研究内容之一。本文的评价方法在我国不同地区和不同尺度上<sup>[14, 17, 19~21]</sup>均得到了较好应用,证明了该模型的广适性和可靠性。由于本文研究区域空间跨度相对较小且生态环境、社会经济特征相近,因此,未在更小尺度上探讨不同施肥地区和水源地之间的距离差异可能对化肥流失系数和化肥施用环境风险带来的影响。研究结果显示,当前十堰市化肥施用强度较高,伴随的环境风险等级整体处于中等风险状态的较高水平,其中氮肥和磷肥施用整体处于重度风险状态的较低水平,钾肥施用风险整体处于中等风险状态的低水平区间。本研究对十堰市单位面积化肥施用负荷、负荷分级及环境风险指数的评估值均较前人<sup>[19]</sup>的研究结果略低,主要是因为本文仅以主要粮食作物和油料作物为研究对象,而未将蔬菜、茶果、药材等经济作物考虑在内。不同地区间的化肥施用风险存在差异,其中竹山县和张湾区已属整体重度风险地区,尤其是这两个地区的氮肥和磷肥施用应格外加以重视。同时,考虑到竹溪县的磷肥和钾肥已进入重度风险状态,且该县当前化肥施用的整体风险指数较高,其演变为重度风险状态的概率不容忽视,应作为潜在的重度风险地区加以控制。

为管控和降低水源区化肥施用的环境风险,笔者认为应从“源头减量—过程阻断—养分再利用——生态修复”4个技术层面考虑采取操作性较强的防控技术。在“控源”层面,可以在郧西县、竹山县、竹溪县和张湾区等玉米+薯类主导型地区推行定额施肥技术,提出单一作物不同元素施用上限,从而促使薯类和玉米等高耗肥作物过施滥施现象得到改善;可以在郧阳区、丹江口市和茅箭区等玉米—小麦主导型地区的小麦生产中应用有机肥等量替代化肥施用技术<sup>[38]</sup>,达到化肥减施目的;还可利用测土配方精准施肥技术和水肥一体化精量施用技术<sup>[13, 39]</sup>等手段,削减化肥投入量。在“阻输”层面,可以在玉米—小麦主导轮作体系中推广应用缓控肥<sup>[40]</sup>,在房县的玉米—油菜轮作体系中采用秸秆还田<sup>[41]</sup>、一次性施肥技术<sup>[42, 43]</sup>、添加生物炭<sup>[44]</sup>等方式,或通过发展间作套种模式、农田边界种植密集型覆草带<sup>[45]</sup>和坡耕地反坡台阶的利用<sup>[46]</sup>等措施,提升化肥综合利用率,降低山区农田化肥随水土流失的风险。在“再利用”层面,可以通过水旱轮作区和麦—玉轮作主导区开展秸秆还田<sup>[47, 48]</sup>、冬闲田种植绿肥翻压、构建种养生态循环模式<sup>[49]</sup>等方式,达到提升农业废弃物利用率,改良土壤结构和肥力状况的目的。在“治汇”层面,通过生态湿地和渗透坝等工程在环境风险敏感区的耦合应用<sup>[50, 51]</sup>,也是一种化肥污染管控的尾端处理思路。此外,在政策引导方面,可以通过强化农业绿色发展生产理念<sup>[52]</sup>、矫正农户施肥认知偏差<sup>[53]</sup>、鼓励分散式经营向集约化经营过渡<sup>[32]</sup>、优化农业补贴结构<sup>[54]</sup>、调整非优势区耕作制度<sup>[55]</sup>等方式,巩固化肥“零增长”成效。在机制创新方面,可以在生态脆弱区和生态敏感区探索基于化肥减量和短期休耕的生态补偿机制,或在县域尺度上建立基于环境风险动态监测的奖惩措施等。总之,化肥施用环境风险防控是一项系统工程,受特定地域的资源条件、地形地貌、产业结构、技术支持等多种因素的综合影响。在制定防控策略时,应根据不同地区化肥污染来源结构及风险发生特征,因地制宜的从技术、观念、政策和体制等角度入手进行分类指导,采取具体的风险防控手段,以实现化肥“减施增效”和环境风险“可防可控”的双重目标。

## 4 结论

(1)丹江口水源涵养区单位耕地氮、磷、钾肥平均施用强度分别为 303.15、146.23 和 105.72kg·hm<sup>-2</sup>，复种指数为 1.62，单位播种面积化肥施用强度为 343.07kg·hm<sup>-2</sup>，超出我国生态县建设化肥施用标准。

(2)丹江口水源涵养区化肥施用在作物间的分布主要集中于玉米和薯类，在空间中的分布主要集中于郧阳区和竹山县，其次为竹溪县和郧西县。

(3)丹江口水源涵养区在化肥类型选择上具有高度的一致性，但不同地区、不同作物间的化肥投入强度差异明显，施用结构不尽合理。

(4)丹江口水源涵养区化肥施用整体处于中等环境风险区间，但氮肥和磷肥施用已进入重度风险状态，迫切需要减少施肥量，降低环境污染风险。

#### 参考文献:

- [1] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析 [J]. 农业经济问题, 2008(8):65-68.
- [2] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):66-74.
- [3] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Non-pointsource pollution from agriculture [EB/OL]. [2017-06-19]. [http://water.epa.gov/polwaste/nps/agriculture/agmm\\_index.cfm](http://water.epa.gov/polwaste/nps/agriculture/agmm_index.cfm).
- [4] LENA B V. Nutrient preserving in Riverine transitional strip [J]. Journal of Human Environment, 1994, 3(6):342-347.
- [5] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4):81-83.
- [6] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [7] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国农业面源污染的现状与控制技术研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5):2548-2552.
- [8] 刘静, 连煜阳. 种植业结构调整对化肥施用量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11):2544-2552.
- [9] 汪翔, 张锋. 中国农业化肥投入现状与地区差异性分析 [J]. 江西农业学报, 2011, 23(12):169-173.
- [10] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率 [J]. 土壤, 2017, 49(6):1067-1077.
- [11] WANG A, TANG L H, YANG D W, et al. Spatio-temporal variation of net anthropogenic

nitrogen inputs in the upper Yangtze River basin from 1990 to 2012 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59( 11) : 1—13.

[12] 张云华, 彭超, 张琛. 氮元素施用与农户粮食生产效率: 来自全国农村固定观察点数据的证据 [J]. *管理世界*, 2019, 35(4):109—119.

[13] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究 [J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(4):671—679.

[14] 任世鑫, 李二玲, 邓晴晴, 等. 中国三大粮食作物化肥施用特征及环境风险评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12):2936—2947.

[15] 尚杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究 [J]. *生态经济*, 2016, 32(5):196—199.

[16] 向平安, 周燕, 黄璜, 等. 氮肥面源污染控制的绿税激励措施探讨——以洞庭湖区为例 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(2):330—337.

[17] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(18):3596—3605.

[18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14( 8) : 975 —1001.

[19] 房珊珊, 杨璐, 强艳芳, 等. 南水北调中线工程水源地化肥施用时空分布特征及其环境风险评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1):124—136.

[20] 高莹, 孙喜军, 吕爽, 等. 陕西省化肥施用时空分异及面源污染风险评价 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2021, 49(2):76—83.

[21] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(9):1512—1518.

[22] 田若衡, 黄成毅, 邓良基, 等. 四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11):1739—1751.

[23] 龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(12):2816—2825.

[24] 裴亮, 刘慧明, 莫家玉, 等. 南水北调中线工程农业非点源污染来源及控制措施 [J]. *生态经济*, 2011(6):164—167.

[25] 徐文佳, 李天宏, 贾振邦, 等. 十堰市非点源污染状况及其区域分布特征 [J]. *北京大学学报*, 2010, 46(4):667—673.

[26] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7):1247—

1253.

[27] 国家发展和改革委员会. 全国农产品收益成本资料汇编—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[28] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2013, 34(1):108—115.

[29] 姜世英, 韩鹏, 贾振邦, 等. 南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2153—2162.

[30] 于伟咏, 漆雁斌, 何悦, 等. 水稻灌溉用水效率和要素禀赋对化肥面源污染的影响: 基于分位数回归的分析 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1274—1284.

[31] 黎孔清, 马豆豆. 生态脆弱区农户化肥减量投入行为及决策机制研究: 以山西省 4 县 421 户农户为例 [J]. 南京农业大学学报(社会科学版) [J], 2018, 18(5):138—145.

[32] 史常亮, 张益, 郭焱, 等. 耕地细碎化对农户化肥使用效率的影响 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2687—2700.

[33] 谢绍文, 杨芬, 冯含笑, 等. 中国化肥农药施用总体特征及减施效果分析 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4):490—495.

[34] 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 等. 成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(7):3555—3564.

[35] 张卫峰, 季玥秀, 马骥, 等. 中国化肥消费需求影响因素及走势分析 II [J]. 资源科学, 2008, 30(1):31—36.

[36] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):217—225.

[37] 刘成, 杨雪, 周晓时, 等. 中国化肥投入对油菜成本效率的影响 [J]. 资源科学, 2018, 40(12):2487—2495.

[38] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质和水分利用率的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):250—258.

[39] 于元赫, 李子君, 姜爱霞, 等. 山东省农业化肥施用强度时空格局演变及驱动力分析 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4):176—186.

[40] 叶青, 曹国军, 耿玉辉. 控释氮肥在小麦玉米轮作体系中的养分高效利用研究 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8):124—129.

[41] 周元, 陈远学, 蒋帆, 等. 玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应 [J]. 水

土保持学报, 2020, 34(2):179—180.

[42] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(20):3827—3839.

[43] 吕伟生, 黄天宝, 肖富良, 等. 缓释肥一次性侧位深施对红壤旱地直播油菜产量形成和肥料利用的影响 [J]. 核农学报, 2021, 35(7):696—706.

[44] 陈庆华, 许卓, 汤计超, 等. 生物炭对土壤氮磷流失和油菜产量的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(11):130—137.

[45] 谢雪东, 倪九派, 周川. 三峡库区坡耕地农桑系统对径流拦截和氮磷流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5):66—69.

[46] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(13):160—169.

[47] 宋时丽, 吴昊, 黄鹏伟, 等. 秸秆还田土壤改良培肥基质和复合菌剂配施对土壤生态的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(11):4562—4576.

[48] 付梦雪, 吴名宇, 韩碧波, 等. 秸秆还田与生物炭配施对麦—玉轮作体系产量和氮素利用率的影响 [J]. 中国农学通报, 2021, 37(8):89—96.

[49] 石鹏飞, 郑媛媛, 赵平, 等. 华北平原种养一体规模化农场氮素流动特征及利用效率——以河北津龙循环农业园区为例 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(4):1281—1288.

[50] 蒋倩文, 刘锋, 彭英湘, 等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 [J]. 环境科学, 2019, 40(5):2194—2201.

[51] 宋志鑫, 宋刚福, 唐文忠, 等. 渗透坝对丹江口库湾水体氮磷负荷削减的应用 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(1):88—94.

[52] 农金花, 梁增芳, 肖新成, 等. 三峡库区农户过量施肥负效应认知实证分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(5):2—8.

[53] 钱宸, 李凡, 李先德, 等. 基于农户经济和环境“双优”目标的粮食主产区化肥施用优化模拟分析——以邯郸地区小麦生产为例 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(6):1481—1493.

[54] 杨秀玉, 乔翠霞. 农业补贴对生态环境的影响——从化肥使用角度分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(7):47—53.

[55] 刘莉, 刘静. 基于种植结构调整视角的化肥减施对策研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1):17—25.